

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.007

小麦气力集排器排种分配系统设计与试验

张晓辉^{1,2} 王永振^{1,2} 仇利^{1,2} 彭传杰^{1,2} 樊桂菊^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 针对现有小麦播种机械作业幅宽小、播种不均匀等问题,设计了一种气力集排式小麦排种分配系统,从播种机的定量排种系统、分配系统等方面研究了气力集排式小麦排种分配机理,分析了排种分配系统的稳定性和均匀性。运用 Solidworks Flow 进行流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)仿真,分析排种分配系统机构参数(输种管、分种外盖)对气室流场的影响,速度流场分布结果表明,排种分配系统具备较理想流场特性的结构参数为:褶皱管波纹长度为 16 mm,波纹角度为 90°,分种外盖圆锥角为 120°。对排种分配系统稳定性和均匀性进行台架试验,结果表明,排种器转速在 20~40 r/min 时,总排量稳定性变异系数为 1.01%~1.19%,各行排量一致性变异系数为 3.20%,种子破碎率为 0.23%,试验结果与 CFD 仿真分析基本一致;样机试验结果表明,总排量稳定性变异系数为 1.06%,各行排量一致性变异系数为 3.34%,排种均匀性变异系数为 27.35%,种子破碎率为 0.28%,满足相关标准要求。

关键词: 小麦; 定量排种; 分种器; 气力集排式

中图分类号: S223.2⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0059-09

Design and Experiment of Wheat Pneumatic Centralized Seeding Distributing System

ZHANG Xiaohui^{1,2} WANG Yongzhen^{1,2} ZHANG Li^{1,2} PENG Chuanjie^{1,2} FAN Guiju^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

(2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: Aimed at the problem of low breadth and uneven wheat sowing machine, a kind of wheat pneumatic centralized sowing system was designed. The sowing mechanism and distribution mechanism were studied from the aspects of concentrated quantitative seeding system and airflow first-order distribution system. The stability of the centralized quantitative seeding system and the uniformity of the seed distribution system were analyzed. Concentrated quantitative seeding system discharged a certain amount of seeds, and the seeds fell into the conveying tube in gravity. Airflow first-order distribution system converted the seeds into a uniform seed stream and transported to the seeding tube, which achieved uniform seeding requirements. According to the principle of distributor, the diameter of the conveying tube was 50 mm. By the computational fluid dynamics (CFD) software Solidworks Flow, the influence of structural parameters of seed distribution system on vacuum chamber fluid were simulated and analyzed. The structural parameters included the conveying pipe and outer cover. The analysis of speed flow field showed that corrugated length of the fold tube was 16 mm, corrugated angle of the fold tube was 90°, and cone angle of outer cover was 120°. The experiments of the uniformity and steadiness was designed and conducted for seeding distribution system. The performance tests were performed with four indices adopted, including variation coefficient of total displacement stability, variation coefficient of each row displacement consistency, seeding rate coefficient of variation of distributor intra-row, and the percentage of damaged seeds in laboratory. The results showed that when rotate speed of sowing device was in the range of 20~40 r/min, variation coefficient of total displacement stability was 1.01%~

收稿日期: 2017-12-07 修回日期: 2018-01-17

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系棉花产业创新团队项目(SDAIT-03-09)、“双一流”奖补资金项目(SYL2017XTTD14)和山东省农机装备研发创新计划项目(2015YZ103)

作者简介: 张晓辉(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: zhangxh@sdau.edu.cn

通信作者: 樊桂菊(1979—),女,副教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: fanguiju2002@163.com

1.19%，variation coefficient of each row displacement consistency was 3.20%，seeding rate coefficient of variation of distributor intra-row was 3.96%，and the percentage of damaged seeds was 0.23%。The test results were consistent with CFD simulation. The field experiment of sowing was also carried out with four indices, including the percentage of damaged seeds, variation coefficient of total displacement stability, variation coefficient of each row displacement consistency, and variation coefficient of seeding uniformity for this device. The results showed that variation coefficient of total displacement stability was 1.06%，variation coefficient of each row displacement consistency was 3.34%，variation coefficient of seeding uniformity was 27.35%，the percentage of damaged seeds was 0.28%，and the seeding emergence rate was 89.63%。These testing results fully coincided with the standard GB/T 9478—2005 Test methods of grain drills. The design and experimentation improved the seeding stability and distribution uniformity of the planter, and the results provided a theoretical reference for the design and analysis of wheat wide precision sowing.

Key words: wheat; quantitative seed; distributor; pneumatic centralized type

0 引言

目前谷物条播机大多使用“一器一行”式排种器,在提高作业速度与增加作业幅宽的同时会造成播种质量下降,机构庞大、臃肿,道路运输困难等问题^[1-2]。河南、山东、河北和安徽等地区的小麦播种田块大、面积广,亟需研究高速作业、大播量的气力集排式播种机。

气力集排式播种机是以气流为载体,通过气流分配系统完成分配排种的播种系统^[3-4]。20世纪80年代气力集排式播种机在美国、澳大利亚、欧洲等国家已得到广泛应用^[5-8],法国库恩 Maxima 气吸式精量播种机、德国索力特 Solitair 气力式精量播种机和美国约翰迪尔气吹式播种机等,具有通用性好、作业速度快等特点,但是机型庞大,价格昂贵,不适合国内市场。我国,杜辉^[9]、赵晓顺等^[10-11]研制的气吸式小麦精量播种机采用吸孔式排种器,该形式的排种器容易导致堵塞、排种不均匀等问题;刘立晶等^[12-13]、常金丽等^[14]研制的气流输送式小麦排种系统采用气流输送种子到各播种行的播种单体导种管,但对排种分配系统缺乏理论研究和仿真分析;祁兵等^[15-16]研制了一种中央集排气送式玉米精量排种器,廖庆喜等^[17-18]研制了气力集排式油菜精量排种器,罗锡文等^[19-21]研究了一种气力集排式水稻分种器。以上学者在玉米、油菜和水稻的播种机理上做了大量研究,为小麦播种分配系统提供了参考。

本文根据农艺播种要求分析气力集排式小麦排种系统和分种系统机理,通过排种分配系统试验台,进行集中定量排种稳定性和分配均匀性等试验,以期得到适应作业幅宽大和播种均匀要求的气力集排式播种机。

1 整机工作原理

以气力集排式小麦排种分配系统为研究重点,

山东农业大学成功研制了2BQ-12型气力一阶集排式播种机^[22],如图1所示,在气力一阶分配系统下,集中定量排种系统将定量种子在输种管内转换成均匀的细种子流输送到排种管完成定量播种。其整机主要技术参数如表1所示。

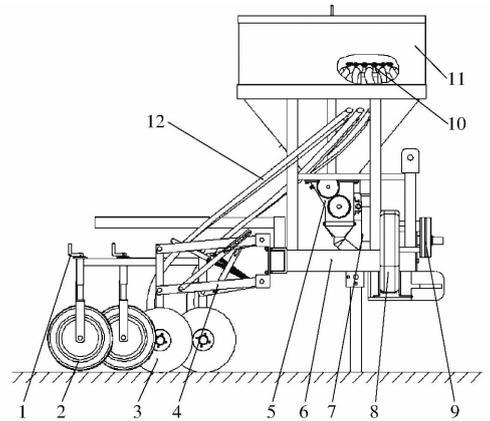


图1 2BQ-12型气力一阶集排式播种机结构图

Fig.1 Schematic diagram of 2BQ-12 airflow first-order centralized metering seeder

1. 播深调节装置 2. 镇压轮 3. 双圆盘开沟器 4. 仿形机构
5. 集中定量排种系统 6. 机架 7. 气力一阶分配系统 8. 风机
9. 动力传递系统 10. 分种器 11. 种箱 12. 排种管

表1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 500×2 600×1 520
整机质量/kg	420
配套动力/kW	40
作业速度/(km·h ⁻¹)	8~12
作业幅宽/mm	2 600
播种行数	12
播种深度/mm	30~100
作业效率/(hm ² ·h ⁻¹)	1.28~3.12

气力一阶集排式播种机播种过程可分为排种、混种、分种和投种4个阶段,本文针对排种分配系统进行理论分析、气流仿真和试验验证。排种过

程^[23-25]是利用集中定量排种系统将种箱的种子定量排出,在重力作用下,种子落入输种管,集中定量排种系统如图2所示,控制系统按播量要求控制步进电动机1和步进电动机2进而控制排种轴不同的转速和外槽轮的工作长度,实现定量排种的要求;分种过程是利用分种系统将集中定量排种系统提供的种子转换为均匀的种子流到各个排种管内,实现均匀播种的要求。

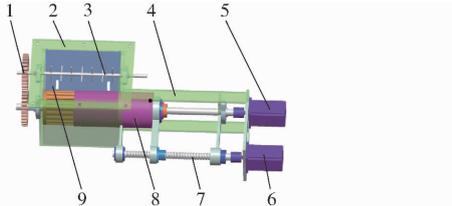


图2 集中定量排种系统结构图

Fig.2 Structure diagram of concentrated quantitative seeding system

1. 齿轮 2. 壳体 3. 搅种器 4. 电动机支架 5. 步进电动机1
6. 步进电动机2 7. 滚珠丝杠副 8. 阻塞套 9. 外槽轮

2 分种器设计

2.1 分种器参数确定

在气流的作用下,分种器将集中定量排种系统输送的种子,经由输种管内褶皱壁的碰撞和分种外盖的分流作用,分配到各个排种管,实现均匀分种的功能,其分种原理如图3所示,箭头的方向为气流运动方向。

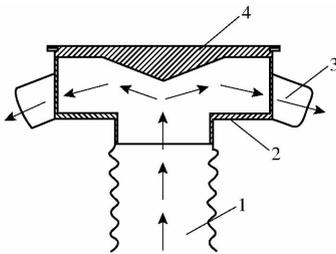


图3 分种器分种原理图

Fig.3 Distribution principle diagram of distributor

1. 输种管 2. 分种内盖 3. 排种管 4. 分种外盖

分种器是气力集排式播种机的核心部件之一,排种管各行排量一致性及行内播种均匀性在很大程度上取决于分种器的形状和结构参数^[26-27]。为保证混种过程中种子混合并向分种器运动,要求每行种子播量相近、播种连续均匀,按照播种要求,确定分种器输送气流速度 v_a 、小麦种子悬浮速度 v_0 与输种管径 D 。

输送气流速度为

$$v_a = K_L \sqrt{\rho_s} + K_d L \quad (1)$$

式中 K_L ——物料粒度系数,小麦为16

K_d ——物料特性系数,小麦为 $2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$

ρ_s ——物料密度,小麦为 $1.37 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

L ——输种管道长度, m

由于 L 很小, $K_d L$ 很小,可以忽略不计,同时考虑到排种系统的密封性,空气速度 $v_a = (1 + 10\%) \times 18.7 = 20.6 \text{ m/s}$,可取 $v_a = 21 \text{ m/s}$ 。

小麦种子悬浮速度为

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{K_s}} \sqrt{\frac{4gd_s(\rho_s - \rho)}{3C\rho}} \quad (2)$$

式中 K_s ——不规则形状修正系数,取11.5

d_s ——小麦种子平均粒径,为5 mm

C ——阻力系数,取0.44

ρ ——空气密度, kg/m^3

g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

计算可得,小麦种子自由悬浮速度 v_0 为 13.2 m/s 。

输送空气流量

$$Q_a = \frac{W_a}{\rho} \quad (3)$$

其中

$$W_a = \frac{W_s}{\varphi} \quad (4)$$

式中 W_a 、 W_s ——单位时间内输送空气和小麦种子质量, kg/s

φ ——料气混合比,取1.3

输种管径为

$$D = \sqrt{\frac{4Q_a}{v_0 \pi}} \quad (5)$$

则输种管道直径圆整后可取 $D = 50 \text{ mm}$ 。

2.2 分种器总体设计

根据分种器设计依据和已知参数,确定分种器整体结构,包括分种外盖、分种内盖、输种管和排种管,整体结构如图4所示,为保证分种外盖和分种内盖同轴度,防止机械设计缺陷导致种子流不能均匀分配到排种管内,减少气种混合流在分配器内产生的涡流、滞流等现象,设计分种外盖和分种内盖螺纹连接,设计分种外盖为圆锥斜面,利用分种外盖占据分配器内腔的排种盲区空间,有利于引导种子进入排种管。因此,分种外盖的形状尺寸决定了分种性能的优劣,设计的主要内容为分种外盖与输种管。

2.2.1 分种外盖

分种外盖的形状应尽量减少涡流、滞流和急剧收缩现象,以免引起混合流的离析、沉淀现象而破坏种子流的分布均匀度。在混种过程中,在气力集排式分种器的喷射作用下,种子呈不规则分布,在由输种管进入分种器后,形成气种混合流等种数流场(Equal amount flow field, EF),在等种数流场和内外

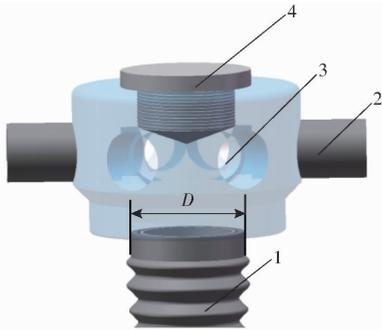


图4 气力集排式分种器结构图

Fig. 4 Structure diagram of pneumatic centralized distributor

1. 输种管 2. 排种管 3. 分种内盖 4. 分种外盖

压力差作用下,使分布不均的种子向中间聚拢^[23]。在等种数流场的作用下对种子进行聚种、分种、派种,其种子分布如图5所示。在EF1输种区域将种子聚拢到中央,在EF2分种区域将种子进行流场导向分布,在EF3排种区域将种子均匀分布到各分种口,完成排种。

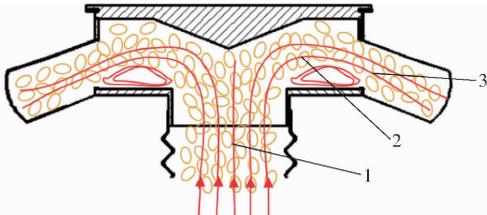


图5 等种数流场小麦种子分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of wheat distribution in equal amount flow field

1. EF1 输种区域 2. EF2 分种区域 3. EF3 排种区域

根据小麦种子等种数流场的分布图,得出分种外盖对小麦种子运动规律影响较大,影响因素主要有圆锥角 θ 和圆锥直径 d ,其圆锥角 θ 和圆锥直径 d 影响小麦种子的分配均匀度。所以,圆锥外盖的尺寸应满足

$$\begin{cases} D \leq d \\ 0 < \theta < \pi \end{cases} \quad (6)$$

根据圆锥外盖尺寸和小麦种子等种数流场分布规律,设计分种外盖形状如图6所示。根据输种管径 D (据式(5), $D=50\text{ mm}$)和分种器总体设计要求确定圆锥直径 d 为70 mm,圆锥角 θ 根据仿真结果确定具体值,依据田间播种行数确定下种口个数为

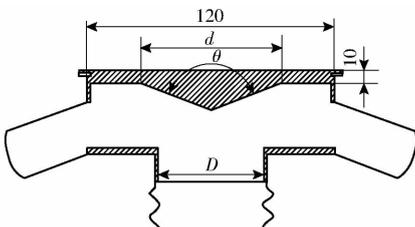


图6 分种外盖结构图

Fig. 6 Structure diagram of distributor outer cover

12个,根据外盖参数即可确定整个分种器的参数和结构。

2.2.2 输种管

为使小麦种子高速集中输入到输种管中,设计的输种管为带波纹的褶皱输种管,当种子与高速气流在输种管内混合后,气种混合流在波纹褶皱输种管断面直径内不断的扩张和缩小,形成对混合流的挤压和拉伸效应,从而有利于打破气种混合流原有的运动状态,促使种子与气流的均匀混合;同时,种子流碰到到波纹管内壁后反向运动,容易形成单个颗粒,有利于提高种子颗粒在管道截面上的均匀性,其轴向断面局部剖视图如图7所示,每段波纹长度为16 mm,波纹角度为 90° ,其余尺寸如图7所示,1个输种管有30个波纹,输种管总长为480 mm。

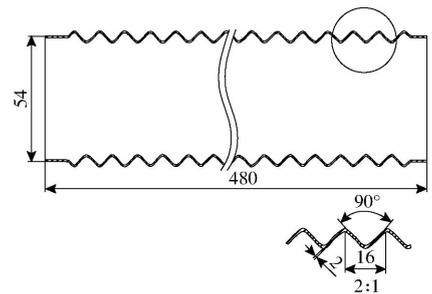


图7 输种管局部剖视图

Fig. 7 Sectional view of conveying tube

3 排种分配系统 CFD 仿真分析

3.1 仿真模型设定

在 Solidworks 三维空间中建立分配系统的三维模型,导入 Flow Simulation 中,按照 CFD 求解过程建立控制方程,设定初始条件及边界条件,划分网格生成计算节点,最终输出仿真结果^[28]。分配系统仿真模型如图8所示。选用自带的湍流模型对不同的分种器进行内部流体分析,同时确保整个模型是封闭的,因此对输种管下端和各分种口创建端盖,设置输

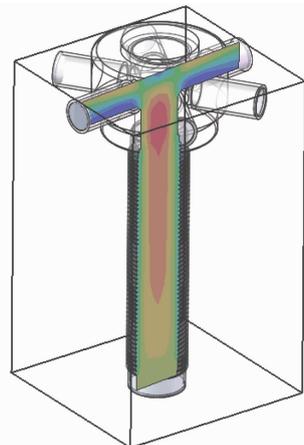


图8 分配系统 CFD 仿真模型

Fig. 8 CFD simulation model of distributor

种管下端输入速度为 21 m/s 的空气,分种口设置出口静压为大气压强 $101\,325 \text{ Pa}$ 。

3.2 不同分配系统结构对比仿真与结果分析

根据分种器设计原则,输种管和分种外盖是分种性能优劣的关键,因此,对输种管和分种外盖建立仿真模型,以气流场内速度分布均匀性作为评价指标,减少分配器内产生的涡流、滞流等现象。设置相同的边界条件和仿真环境,建立2组因素对比分析,因素1为输种管的内部结构,包括褶皱管和光滑直管,分种外盖一致,因素2为分种外盖锥角的变化,包括锥角为 180° 、 160° 、 140° 、 120° 、 100° 、 80° ,输种管一致。2组速度流场分布仿真结果如图9所示。

从速度流场分布(图9a)可以看出,在直管结构中,流体速度处于 $15 \sim 16 \text{ m/s}$ 之间,速度变化较小,流场稳定,不利于种子均匀分配。在褶皱管结构中,由于管道内径周期性的扩张和收缩,导致气流受到不断拉伸和压缩作用,在靠近管壁处,气流速度相对较低,约为 3 m/s ,在褶皱管的中心位置,气流速度达到最大,约为 15 m/s ,管道内径的交替变化,引起气流速度在径向上的持续变化。因此,褶皱管结构相对于直管结构对分配系统内部流场的分布影响更大,分配均匀性更好,有利于打破流体原有的运动状态。

从速度流场分布(图9b)可以看出,气流到达分配器后与分种外盖发生碰撞。当锥角为 180° 时,速度变化大,从 21 m/s 降到 1 m/s ,种子在分种外盖附近产生涡流、滞流等现象。锥角 160° 和 140° 均存在此现象,当锥角为 120° 时,速度变化均匀,在 $10 \sim 20 \text{ m/s}$ 之间,有利于引导气流进入各个输种管道。当锥角在 100° 和 80° 时,种子以较高速度(约 16 m/s)冲向分种外盖,造成种子与分配外盖激烈碰撞,种子破碎率增高。

综上分析,当高速气流进入褶皱管后,由于褶皱管断面直径周期性的持续扩张和收缩,进而形成对流场的挤压和拉伸作用,从而打破气体原有的运动状态,促使种子与气流的均匀混合;同时,选用锥角为 120° 的分种外盖,有利于保证分配器内部流场的均匀,降低种子破碎率,因此,选用分种外盖锥角为 120° ,褶皱输种管。

4 台架试验

通过理论计算、CFD 仿真分析,设计了气力集排式排种分配系统的总体结构,下面通过台架试验验证其总体结构的适用性和理论分析的合理性;通过排种均匀性、各行之间播种均匀性和行内稳定性等试验判定排种分配系统的排种分配效果。

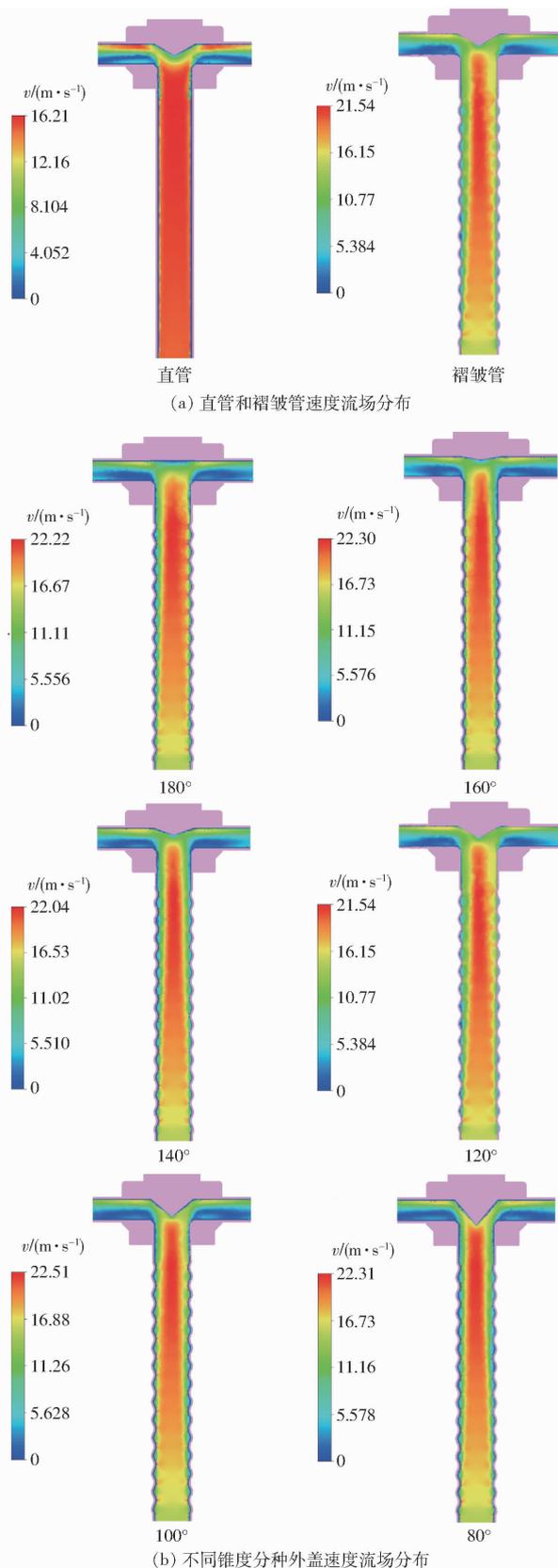


图9 不同分种器结构速度流场分布

Fig.9 Velocity flow field distributions of different distributors

4.1 材料与设备

试验材料选用在山东省种植广泛且产量稳定的山农28号小麦,长度平均值 6.43 mm ,宽度平均值 3.36 mm ,厚度平均值 2.51 mm ,千粒质量为 48.6 g ,

容重 794.8 g/L。

试验设备为自制的小麦排种分配装置试验台,如图 10 所示,该装置主要由风送系统、控制系统、排种系统和分配系统等组成。其他试验设备包括腾越通风设备有限公司生产的 2.2 kW 离心风机,最大流量 2 496 m³/h,最大风压 1 200 Pa;霍尔转速记录仪(量程 0~200 r/min,分辨率 0.1 r/min)、电子天平(量程 0~1 000 g,精度 0.01 g)、秒表、接种杯(2 L),筛板(500 mm×500 mm)等。

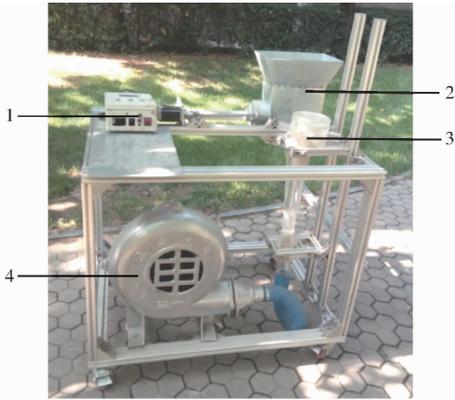


图 10 排种分配装置试验台

Fig. 10 Experiment platform of seeding distribution device

1. 控制系统 2. 排种系统 3. 分配系统 4. 风送系统

4.2 试验设计与方法

为测得集中定量排种系统总排量稳定性,测量集中定量排种器的转速与总排量稳定性变异系数的关系。排种器转速 20~40 r/min,取 6 个水平,用接种杯收集排种器内的种子,每次收集时间为 30 s,重复 5 次取平均值。

排种分配系统分种性能通过各行之间播量变异系数测定分种均匀性,通过行内播量变异系数测定分种稳定性。试验分为 8 组,分别标记为 t1、t2、t3、t4、t5、t6、t7、t8。t1 为直管分种器;t2 为褶皱管分种器,t1、t2 分种外盖均为 120°圆锥盖;t3 为分种外盖为 180°平盖;t4 为分种外盖为 160°圆锥盖;t5 为分种外盖为 140°圆锥盖;t6 为分种外盖为 120°圆锥盖;t7 为分种外盖为 100°圆锥盖;t8 为分种外盖为 80°圆锥盖。t3~t8 分种器均为褶皱管。排种管标

记为 $i(i=1,2,\dots,12)$,种箱中加入提前去除杂质及破碎籽粒的种子 600 g,每次试验重复 5 次取平均值。对第 i 行排出的种子称量,取 5 次质量的平均值,记为 x_i ,单位为 g。每组试验结束后,统计 12 行排种管内的种子总粒数,选出破碎损伤的种粒数。

种子破碎率为

$$P = \frac{W_p}{W_y} \times 100\% \quad (7)$$

式中 P ——种子破碎率,%

W_p ——样本破碎种粒个数

W_y ——样本种粒总数

排种分配系统小麦种子整体排尽率为

$$S = \frac{n\bar{x}}{W_z} \times 100\% \quad (8)$$

式中 n ——总行数

\bar{x} ——分种器各行排出小麦种子平均值,g

W_z ——种箱中加入种子的质量,g

变异系数计算式为

$$C_v = \frac{1}{\bar{X}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \times 100\% \quad (9)$$

其中

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (10)$$

式中 C_v ——变异系数

\bar{X} ——平均值 X_i ——样本数

4.3 试验结果与分析

集中定量排种系统试验结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,在排种轴外槽轮长度一定时,排种器转速在 20~40 r/min 时,总排量稳定性变异系数为 1.01%~1.19%,转速为 28 r/min 时,总排量稳定性变异系数最小,为 1.01%。在高速时变异系数较大是因为外槽轮转速过快,存在填充不及时现象,导致排种量不稳定。

排种分配系统试验结果如表 3、4 所示。根据集中定量排种系统试验数据,选择总排量稳定性变异系数最小时的排种轴转速 28 r/min 进行排种分配系

表 2 集中定量排种器各转速下试验结果

Tab. 2 Test results of concentrated quantitative seeding system with different rotational speeds of seed shaft

转速/ (r·min ⁻¹)	排种量/g					均值/g	标准差/g	变异系数/ %
	1	2	3	4	5			
20	466.90	457.10	465.40	460.50	455.80	461.14	4.91	1.07
24	548.80	558.20	551.30	543.20	554.70	551.24	5.72	1.04
28	645.30	656.50	646.90	638.10	646.20	646.60	6.56	1.01
32	721.40	739.80	730.50	718.60	727.90	727.64	8.32	1.14
36	824.60	834.90	816.20	809.70	821.40	821.36	9.44	1.15
40	921.70	925.50	910.30	939.10	915.50	922.42	10.99	1.19

统试验。由表3可知,小麦种子整体排尽率大于等于99%。t1试验各行之间播量变异系数为8.50%,t2变异系数为3.27%,试验数据表明褶皱管分种器比直管分种效果好;t6变异系数为3.20%,均小于

t3、t4、t5、t7、t8,t6种子破碎率为0.29%,小于t7、t8,通过对比t6与其他对比组的试验数据可知分种外盖为锥角120°时,变异系数最小,种子破碎率最低,试验结果与仿真结果一致。

表3 分种器各行播量
Tab.3 Seeding rate of distributor rows

行序号	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	g
1	56.73	49.53	45.15	51.84	54.17	48.69	50.84	47.64	
2	44.63	52.17	53.42	52.36	50.64	51.34	46.91	51.42	
3	46.67	48.08	46.74	46.65	53.42	50.26	48.67	54.37	
4	51.24	49.25	48.59	45.89	46.81	47.61	46.29	50.26	
5	45.81	51.84	47.83	53.21	45.76	49.35	53.47	46.55	
6	53.75	48.39	56.37	50.42	48.92	50.67	51.26	46.16	
7	55.34	49.07	52.84	47.45	47.68	48.40	49.32	46.78	
8	47.65	47.68	43.69	54.89	52.46	47.12	48.16	49.31	
9	46.86	51.34	47.25	48.14	49.82	52.21	54.42	51.68	
10	52.49	49.56	48.31	46.49	49.60	49.97	47.60	49.40	
11	50.07	48.13	55.67	48.37	47.73	47.65	49.34	51.75	
12	44.62	51.77	44.30	46.61	48.25	49.11	48.68	50.47	
各行平均值	49.66	49.73	49.18	49.36	49.61	49.37	49.58	49.65	
变异系数/%	8.50	3.27	8.84	6.20	5.33	3.20	5.04	5.05	
种子破碎率/%	0.41	0.23	0.37	0.31	0.34	0.29	0.54	0.61	

表4 分种器行内播量变异系数

Tab.4 Seeding rate coefficient of variation of distributor intra-row

行序号	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	%
1	6.32	3.41	7.20	9.27	6.07	3.47	4.67	5.30	
2	12.44	2.98	14.58	6.45	5.45	5.30	3.89	7.69	
3	4.93	4.87	6.14	9.71	8.19	4.91	7.15	6.42	
4	7.26	3.53	12.69	7.48	6.62	2.84	6.43	9.37	
5	13.37	6.49	9.67	5.61	8.61	3.65	8.40	4.50	
6	8.51	5.40	5.49	6.57	7.68	5.11	6.95	8.28	
7	10.34	2.31	9.15	9.69	5.45	3.42	4.80	5.56	
8	11.52	4.57	13.64	7.56	4.16	2.06	6.02	4.22	
9	14.10	3.85	9.83	6.83	8.34	6.16	7.37	7.30	
10	8.95	5.64	6.17	8.25	6.59	4.92	4.19	6.97	
11	11.26	4.29	5.96	6.13	4.52	3.48	9.24	4.24	
12	6.33	3.78	10.50	7.84	6.29	2.15	5.63	8.40	
各行平均变异系数	9.61	4.26	9.25	7.62	6.50	3.96	6.23	6.52	

由表4可知,t2比t1平均变异系数小5.35%,褶皱输种管对行内播种的稳定性影响显著,能提高分种的稳定性;在分种外盖试验中,平均变异系数t6最小为3.96%,说明锥角为120°分种外盖有利于行内播种的稳定性。

5 田间试验

经过理论分析、流体仿真和试验台试验,对2BQ-12型气力一阶集排式播种机进行改进并于

2016年9月在山东农业大学农学试验站进行播种试验,如图11所示,以山东小麦300 kg/hm²播量作为要求播种量,播种前统计播种量,进行总排量稳定性试验、各行排量一致性试验和排种均匀性试验等。总排量稳定性试验、各行排量一致性试验和种子破碎率试验在室内进行;排种均匀性和出苗率在田间试验。排种均匀性选择在大田试验结束,待出苗整齐后,按照棋盘式布点法^[29],选取田间10个采样点,每个采样点测定30 cm内小麦的总苗数,测定该

区域内发芽小麦之间的距离作为播种均匀性试验的数据;待出苗整齐后,按照棋盘式布点法,选取田间10个采样点,每个采样点测定100 cm内小麦的总苗数,求其均值,换算成该田地面积下的出苗数作为出苗率的试验数据。



图11 2BQ-12型气力一阶集排式播种机试验

Fig.11 2BQ-12 airflow first-order centralized metering seeder

对播种机进行综合性能测试,每个指标均取10次重复测量的平均值。具体试验数据如表5所示。

由于田间作业时,同时进行开沟、施肥等多项作业,使播种机阻力增大,产生较强的振动,因此导致田间试验合格指数低于排种性能试验。进行播种作业时可根据实际田间状态和作业要求改用大功率拖拉机,以改善播种性能。

表5 样机试验结果

Tab.5 Prototype test results

参数	合格指标	试验值
总排量稳定性变异系数/%	≤ 1.3	1.06
各行排量一致性变异系数/%	≤ 3.9	3.34
排种均匀性变异系数/%	≤ 45	27.35
种子破碎率/%	≤ 0.5	0.28
出苗率/%	≥ 85	89.63

6 结论

(1)设计了一种气力集排式小麦排种分配系统,通过对集中定量排种分配系统的理论研究和CFD仿真分析,得到排种分配系统结构参数:输种管直径为50 mm,褶皱管波纹长度为16 mm,波纹角度为 90° ,分种外盖圆锥角为 120° 。

(2)台架试验结果表明:褶皱输种管与锥角 120° 的分种外盖组合,排种器转速在20~40 r/min时,总排量稳定性变异系数为1.01%~1.19%,行内播量变异系数为3.96%,种子破碎率为0.23%,试验结果与CFD仿真分析基本一致。

(3)田间试验结果表明:总排量稳定性变异系数为1.06%,各行排量一致性变异系数为3.34%,排种均匀性变异系数为27.35%,种子破碎率为0.28%,出苗率为89.63%。

参 考 文 献

- 杨慧,刘立晶,周军平,等.气流输送式条播机现状及我国应用情况分析[J].农机化研究,2013,35(12):216-220. YANG Hui, LIU Lijing, ZHOU Junping, et al. Analysis of air seed drill current situations and using situation in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013,35(12):216-220. (in Chinese)
- 张敏,吴崇友.气力输送式播种机概况及我国的应用前景分析[J].中国农机化,2008(2):70-72. ZHANG Min, WU Chongyou. The survey and the prospect in China of the pneumatic drills[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2008(2):70-72. (in Chinese)
- 张婷婷,尚书旗,王东伟.六行同步小区条播机的研制[J].农机化研究,2017,39(5):144-149. ZHANG Tingting, SHANG Shuqi, WANG Dongwei. Design of six lines synchronous plot seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(5):144-149. (in Chinese)
- 曹成茂,王安民,秦宽,等.一器多行环槽推送式排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2014,45(4):128-134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140420&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.020. CAO Chengmao, WANG Anmin, QIN Kuan, et al. Multi-line metering device with ring groove push movement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):128-134. (in Chinese)
- BOURGES G, MEDINA M. Air-seeds flow analysis in a distributor head of an "air drill" seeder[J]. Acta Horticulturae, 2013, 1008(1008):259-264.
- FURUHATA M, CHOSA T, SHIOYA Y, et al. Developing direct seeding cultivation using an air-assisted strip seeder[J]. Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly, 2015, 49(3):227-233.
- MANZONE M, PAOLO M, MARIO T, et al. Performance evaluation of a cyclone to clean the air exiting from pneumatic seed drills during maize sowing[J]. Crop Protection, 2015, 76:33-38.
- KOLLER A, WAN Y, MILLER E, et al. Test method for precision seed simulation systems[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(5):1283-1290.
- 杜辉.气吸式小麦精量播种机的改进研究[D].泰安:山东农业大学,2003. DU Hui. Study on improvement of wheat pneumatic precise seeder[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- 赵晓顺,于华丽,张晋国,等.槽缝气吸式小麦精量排种器[J/OL].农业机械学报,2013,44(2):48-51. http://www.j-

- csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130210&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.010.
- ZHAO Xiaoshun, YU Huali, ZHANG Jinguo, et al. Slot-type pneumatic precise wheat seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):48-51. (in Chinese)
- 11 赵晓顺, 于华丽, 马跃进, 等. 负压式小麦精量排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 11-18.
- ZHAO Xiaoshun, YU Huali, MA Yuejin, et al. Parameter optimization and experiment of negative pressure precision seed-metering device for wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 11-18. (in Chinese)
- 12 刘立晶, 杨学军, 李长荣, 等. 2BMG-24型小麦免耕播种机设计[J]. 农业机械学报, 2009,40(10):39-43.
- LIU Lijing, YANG Xuejun, LI Changrong, et al. Design of 2BMG-24 no-till wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(10):39-43. (in Chinese)
- 13 刘立晶, 刘忠军, 杨学军, 等. 气流输送式小麦免耕播种机设计和试验[J]. 农业机械学报, 2011,42(2):54-57.
- LIU Lijing, LIU Zhongjun, YANG Xuejun, et al. Design and test on pneumatic no-till wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2):54-57. (in Chinese)
- 14 常金丽, 张晓辉. 2BQ-10型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011,27(1):136-141.
- CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(1): 136-141. (in Chinese)
- 15 祁兵, 张东兴, 崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013,29(18): 8-15.
- QI Bing, ZHANG Dongxing, CUI Tao. Design and experiment of centralized pneumatic seed metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(18): 8-15. (in Chinese)
- 16 祁兵, 张东兴, 刘全威, 等. 集排式精量排种器清种装置设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2015,31(1):20-27.
- QI Bing, ZHANG Dongxing, LIU Quanwei, et al. Design and experiment of cleaning performance in a centralized pneumatic metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(1): 20-27. (in Chinese)
- 17 廖庆喜, 张猛, 余佳佳, 等. 气力集排式油菜精量排种器[J]. 农业机械学报, 2011,42(8): 30-34.
- LIAO Qingxi, ZHANG Meng, YU Jiajia, et al. Pneumatic centralized metering device for rape seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(8): 30-34. (in Chinese)
- 18 廖庆喜, 高焕文, 舒彩霞. 水平圆盘精密排种器新型推刮种器[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1): 60-64.
- LIAO Qingxi, GAO Huanwen, SHU Caixia. Study on new-type pusher and ejector of horizontal plate precision metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 60-64. (in Chinese)
- 19 张明华, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻直播机组合型孔排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016,47(9):29-36.
- ZHANG Minghua, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of combined hole-type metering device of rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016,47(9):29-36. (in Chinese)
- 20 罗锡文, 蒋恩臣, 王在满, 等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制[J]. 农业工程学报, 2008,24(12):52-56.
- LUO Xiwen, JIANG Enchen, WANG Zaiman, et al. Precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(12): 52-56. (in Chinese)
- 21 戴亿政, 罗锡文, 王在满, 等. 气力集排式水稻分种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 36-42.
- DAI Yizheng, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 36-42. (in Chinese)
- 22 沈景新. 2BQ-12型气流一阶集排式播种机的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- SHEN Jingxin. Research of 2BQ-12 airflow first-order centralized metering seeder[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 23 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- SHI Song. Design and experimental research of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 24 王福林, 尚家杰, 刘宏新, 等. EDEM颗粒体仿真技术在排种机构研究上的应用[J]. 东北农业大学学报, 2013,44(2): 110-114.
- WANG Fulin, SHANG Jiajie, LIU Hongxin, et al. Application of EDEM particles simulation technology on seed-metering device research[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013,44(2): 110-114. (in Chinese)
- 25 王芳, 吕冰, 王洪明, 等. 气吸式谷子排种装置吸种孔的结构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017,33(8):30-36.
- WANG Fang, LÜ Bing, WANG Hongming, et al. Structural design and test of seed-suction hole of air-sucking seed-metering device for millet[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(8): 30-36. (in Chinese)
- 26 李中华, 王德成, 刘贵林, 等. 气流分配式排种器 CFD 模拟与改进[J]. 农业机械学报, 2009,40(3): 64-68.
- LI Zhonghua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. CFD simulation and improvement of air-stream distributive metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(3): 64-68. (in Chinese)
- 27 邹翌, 郝向泽, 何瑞银. 基于 EDEM-Fluent 耦合的气流分配式排种器数值模拟与试验[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(4): 1-7.
- ZOU Yi, HAO Xiangze, HE Ruiyin. Numerical simulation and experiment of air distribution seed metering device based on coupled EDEM-Fluent[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017,38(4): 1-7. (in Chinese)
- 28 陈超祥, 胡其登. Solidworks Flow simulation 教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- 29 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.